

Математическая модель поля напряжений в целиках с учетом магистральной трещины на угольных месторождениях

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-56-58>

ХАЛКЕЧЕВ К.В.

Доктор физ.-мат. наук,
доктор техн. наук,
профессор кафедры геологии
и маркшейдерского дела
НИТУ «МИСУС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: h_kemal@mail.ru

ХАЛКЕЧЕВ Р.К.

Доктор техн. наук, доцент,
профессор кафедры
инфокоммуникационных технологий
НИТУ «МИСУС»,
119049, г. Москва, Россия,
e-mail: syrus@list.ru

ЛЕВКИН Ю.М.

Доктор техн. наук,
член Союза маркшейдеров России,
профессор Московского
политехнического университета,
105064, г. Москва, Россия,
e-mail: lev5353@bk.ru

С целью определения напряженно-деформированного состояния в целиках, представленных полнокристаллическими горными породами, на угольных месторождениях построена математическая модель поля напряжений с учетом магистральной трещины. Предполагается, что исследуемый целик обладает полнокристаллической структурой, в которой имеется горизонтально ориентированная трещина. Размеры такой трещины превосходят характерный размер элементарного объема. Магистральная горизонтально направленная раскрытая трещина в целике имеет техногенное происхождение и индуцирует дополнительное собственное внутреннее поле напряжений. С другой стороны, внутреннее поле напряжений, обусловленное структурными особенностями полнокристаллических горных пород, способствует образованию вертикально ориентированных трещин. При этом, если они образовали магистральную трещину, то целик потеряет устойчивость, что может привести к аварийной ситуации. В результате, напряженное состояние в целиках образуется суперпозицией напряжений, индуцированных внешним полем и полем, наведенным магистральной трещиной.

Ключевые слова: математическая модель, устойчивость целика, напряженное состояние, магистральная трещина, полнокристаллическая горная порода, неоднородная среда, эффективный модуль упругости, суперпозиция полей напряжений.

Для цитирования: Халкечев К.В., Халкечев Р.К., Левкин Ю.М., Математическая модель поля напряжений в целиках с учетом магистральной трещины на угольных месторождениях // Уголь. 2023. № 7. С. 56-58. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-56-58.

ВВЕДЕНИЕ

На пластовых месторождениях, к числу которых относится и большинство угольных, наибольшее распространение в настоящее время имеют камерные системы разработки. К недостаткам камерной системы, в первую очередь, необходимо отнести большие потери полезных ископаемых в целиках, достигающие 60-70%. При этом, если оставляемые целики излишне больших размеров, это ведет к неоправданным потерям запасов полезного ископаемого в недрах, в то время как при недостаточном размере целиков их разрушение может привести к потере устойчивости горных выработок. Поэтому определение напряженно-деформированного состояния целиков в угольных шахтах, которое определяет оптимальные размеры целиков и их устойчивость, является актуальной задачей.

Как показывает опыт, экспериментальные и натурные методы [1, 2, 3, 4] определения напряженно-деформированного состояния целиков не в состоянии решить данную проблему. Единственно возможным вариантом является математическое моделирование, позволяющее определить напряженное состояние в целиках, что позволит прогнозировать их устойчивость.

подавляющее большинство существующих математических моделей [5, 6] в данном направлении не учитывают структурно-текстурные особенности и трещиноватость целиков, в особенности, когда речь идет о магистральных трещинах. Поэтому целесообразно разработать математическую модель, позволяющую определить неоднородное анизотропное поле напряжений в окрестности магистральной трещины в целике.

ОСНОВНОЙ РАЗДЕЛ

Для решения поставленной задачи по математическому моделированию напряженно-деформированного состояния целиков, представленных углевмещающими породами полнокристаллической структуры, с учетом магистральной трещины, построим содержательную модель, на основе которой представится возможность разработки математической модели.

Рассмотрим целик полнокристаллической структуры, на торец которого действует внешнее поле напряжений (горное давление), которое может быть определено по длине вертикально ориентированной трещины [7]. Предполагается, что в целике имеется горизонтально ориентированная трещина, размеры которой превосходят характерный размер элементарного объема; это позволит считать трещину магистральной. Поле напряжений в целиках будет складываться из полей напряжений, индуцированных внешним полем и полем, наведенным магистральной трещиной.

Построим математическую модель на основе разработанной содержательной модели. Поставим в соответствие целику полнокристаллической структуры упругую среду с неоднородностями, соответствующими зернам горной породы. Отсюда, используя метод аналогии с работами [8, 9, 10, 11], для поля напряжений в неоднородной среде получим:

$$\sigma = C(I + AC_1)^{-1} < C(I + AC_1)^{-1} >^{-1} \sigma_0, \quad (1)$$

где σ_0 – внешнее поле напряжений, действующее в точке определения напряжения; C – модуль упругости зерна горной породы; $C_1 = C - \langle C \rangle$; « $\langle \rangle$ » – усреднение по ансамблю полей неоднородностей; I – единичный четырехвалентный тензор; A – преобразование Фурье ядра интегрального оператора.

Поскольку рассматриваемый целик представлен полнокристаллической горной породой, можно использовать для определения напряжения, наведенного трещиной, плоскую модель. Используя метод аналогий с работой [12], компоненты напряжений у вершины раскрытой трещины будут иметь вид:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}, \quad (4)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \quad (5)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \quad (6)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненты тензора напряжений; K_I – коэффициент интенсивности напряжений; θ – полярный угол в точке определения напряжения; r – полярный радиус в точке определения напряжения; ν – коэффициент Пуассона.

Суперпозиция напряжений (1) и (2-6) определяет внутреннее напряжение в углевмещающем целике полнокристаллической структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученное решение (1-6) определяет поле напряжений в целиках, представленных полнокристаллической горной породой, с учетом магистральной трещины на угольных месторождениях. На основе полученных решений можно сделать следующие выводы:

– магистральная горизонтально направленная раскрытая трещина в целике имеет техногенное происхождение и индуцирует дополнительное собственное внутреннее поле напряжений;

– внутреннее поле напряжений, обусловленное структурными особенностями полнокристаллических горных пород, способствует образованию вертикально ориентированных трещин. При этом, если они образовали магистральную трещину, то целик потеряет устойчивость;

– суперпозиция напряжений (1-6) способствует формированию неоднородного поля напряжений в целике.

Список литературы

1. Qu X., Chen Y., Yin D. Experimental study on progressive failure characteristics of strip coal pillar models under different roof and floor conditions // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18. Article e02147. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02147.
2. Coupling influence of inclination angle and moisture content on mechanical properties and microcrack fracture of coal specimens / L. Chen, D.S. Zhang, N. Yao et al. // *Lithosphere*, 2021. 2022. (Special 7). Article 6226445. DOI: 10.2113/2022/6226445.
3. Study on failure mechanism of room and pillar with different shapes and configurations under uniaxial compression using experimental test and numerical simulation / V. Sarfarazi, N. Babanouri, S. Fattahi et al. // *Underground Space*. 2023. Vol. 9. P. 105-121. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.07.002.
4. Левкин Ю.М. Использование технологии дистанционного зондирования и математического моделирования для анализа аварийных горных выработок // *Уголь*. 2022. № 6. С. 32-34. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.
5. Cooperative mining technology and strata control of close coal seams and overlying coal pillars / S. Qiang, G. Jialiang, Y. Feng et al. // *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 73. P. 473-485. DOI: 10.1016/j.aej.2023.04.071.

6. Pseudo-discontinuum model to simulate hard-rock mine pillars / E. Rógenes, A.D.S. Gomes, M.M.D. Farias et al. // *Underground Space*. 2023. Vol. 11. P. 81–95. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.12.002.
7. Халкечев Р.К. Теория мультифрактального моделирования процессов деформирования и разрушения породных массивов как основа автоматизации технологии буровзрывных работ на угольных разрезах // *Уголь*. 2019. № 11. С. 32-35. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-32-34.
8. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Математическое моделирование неоднородного упругого поля напряжений породного массива кристаллической блочной структуры // *Горный журнал*. 2016. № 3. С. 200-205. DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05.
9. Халкечев Р.К., Халкечев К.В. Управление селективностью разрушения при дроблении и измелении геоматериалов на основе методов подобия и размерности в динамике трещин // *Горный журнал*. 2016. № 6. С. 64-66. DOI: 10.17580/GZH.2016.06.04.
10. Халкечева Л.К., Халкечев Р.К. Автоматизированная система мониторинга состояния транспортных берм на предмет оползневой опасности в виде проседания // *Уголь*. 2022. № 4. С. 50-52. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.
11. Халкечев Р.К. Нечеткая математическая модель изменения концентрации трещин в минерале под действием внешней нагрузки // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2019. № 6. С. 97-105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.
12. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. М: Наука, 1974. 640 с.

Original Paper

UNDERGROUND MINING

UDC 622.272:658.012.122:51.001.57 © K.V. Khalkechev, R.K. Khalkechev, Yu.M. Levkin, 2023
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 7, pp. 56-58
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-7-56-58>

Title

MATHEMATICAL MODEL OF THE STRESS FIELD IN THE PILLARS WITH DUE ACCOUNT TAKEN OF THE MAIN CRACK IN COAL FIELDS

Authors

Khalkechev K.V.¹, Khalkechev R.K.¹, Levkin Yu.M.²

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (NUST "MISIS"), Moscow, 119049, Russian Federation

² Moscow Polytechnic University, Moscow, 105064, Russian Federation

Authors Information

Khalkechev K.V., Doctor of Physico-Mathematical Science, Doctor of Engineering Sciences, Professor at subdepartment: "Geology and mine surveying", e-mail: h_kemal@mail.ru

Khalkechev R.K., Doctor of Engineering Sciences, Professor at subdepartment: "Infocommunication technologies", e-mail: syrus@list.ru

Levkin Yu.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Member of the Russian Union of Surveyors, e-mail: lev5353@bk.ru

Abstract

In order to determine the stress-strain state in the pillars represented by full-crystalline rocks, a mathematical model of the stress field with due account taken of the main crack was constructed. It is assumed that the analyzed pillar has a full-crystalline structure, in which there is a horizontally oriented crack. The dimensions of this crack exceed the characteristic size of the elementary volume. The main horizontally oriented open crack in the pillar has technogenic origin and induces an additional internal stress field. On the other hand, the internal stress field, due to the structural features of full-crystalline rocks, contributes to the formation of vertically oriented cracks. Moreover, if they formed a main crack, then the pillar will lose stability, which can lead to an emergency. As a result, the stress state in the pillars is formed by a superposition of stresses induced by the external field and the field induced by the main crack.

Keywords

Mathematical model, Pillar stability, Stress state, Fracture, Full-crystalline rock, Inhomogeneous medium, Effective elastic modulus, Superposition of stress fields.

References

1. Qu X., Chen Y. & Yin D. Experimental study on progressive failure characteristics of strip coal pillar models under different roof and floor conditions. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, (18), Article e02147. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02147.
2. Chen L., Zhang D.S., Yao N., Wang L., Fan G.W., Wang X.F. & Zhang W. Coupling influence of inclination angle and moisture content on mechanical properties and microcrack fracture of coal specimens. *Lithosphere*, 2021, 2022, (Special 7), Article 6226445. DOI: 10.2113/2022/6226445.
3. Sarfarazi V., Babanouri N., Fattahi S. & Asgari K. Study on failure mechanism of room and pillar with different shapes and configurations under uniaxial

compression using experimental test and numerical simulation. *Underground Space*, 2023, (9), pp. 105-121. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.07.002.

4. Levkin Yu.M. The usage of remote sensing technology and mathematical modeling for the analysis of emergency mine workings. *Ugol'*, 2022, (6), pp. 32-34. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-32-34.

5. Qiang S., Jialiang G., Feng Y. & Ruhong B. Cooperative mining technology and strata control of close coal seams and overlying coal pillars. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, (73), pp. 473-485. DOI: 10.1016/j.aej.2023.04.071.

6. Rógenes E., Gomes A.D.S., Farias M.M.D. & Rasmussen, L.L. Pseudo-discontinuum model to simulate hard-rock mine pillars. *Underground Space*, 2023, (11), pp. 81–95. DOI: 10.1016/j.undsp.2022.12.002.

7. Khalkechev R.K. Multifractal modeling theory of rock mass deformation and destruction as the basis for automation of drilling and blasting technologies in coal open-pit mines. *Ugol'*, 2019, (11), pp. 32-34. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2019-11-32-34.

8. Khalkechev R.K. & Khalkechev K.V. Mathematical modeling of non-uniform elastic stress field of a rock mass with crystalline block structure/ *Gornyj zhurnal*, 2016, (3), pp. 200-205. (In Russ.). DOI: 10.17580/gzh.2016.03.05.

9. Khalkechev R.K. & Khalkechev K.V. Management of fracture selectivity in crushing and milling of geomaterials based on similarity and dimensional methods in fracture dynamics. *Gornyj zhurnal*, 2016, (6), pp. 64-66. (In Russ.). DOI: 10.17580/GZH.2016.06.04.

10. Khalkecheva L.K. & Khalkechev R.K. Automated monitoring system of transport berms condition for landslide danger in the form of subsidence. *Ugol'*, 2022, (4), pp. 50-52. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2022-4-50-52.

11. Khalkechev R.K. Fuzzy mathematical model of fracture concentration changes in a mineral under external load. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, 2019, (6), pp. 97-105. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.

12. Cherepanov G.P. Mechanics of brittle fracture. Moscow, Nauka Publ., 1974, 640 p. (In Russ.).

For citation

Khalkechev K.V., Khalkechev R.K. & Levkin Yu.M. Mathematical model of the stress field in the pillars with due account taken of the main crack in coal fields. *Ugol'*, 2023, (7), pp. 56-58. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-7-56-58.

Paper info

Received June 6, 2023

Reviewed June 14, 2023

Accepted June 26, 2023